



5

## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets <sup>6</sup> : H04B 7/005, H04L 25/03	A1	(11) Numéro de publication internationale: WO 98/47240 (43) Date de publication internationale: 22 octobre 1998 (22.10.98)
---	----	---

(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR98/00735

(22) Date de dépôt international: 10 avril 1998 (10.04.98)

(30) Données relatives à la priorité:  
97/04653 14 avril 1997 (14.04.97) FR(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): NORTEL  
MATRA CELLULAR [FR/FR]; 1, place des Frères Mont-  
golfier, F-78042 Guyancourt Cedex (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (US seulement): BEN RACHED,  
Nidham [TN/FR]; 32, rue Baron, F-75017 Paris (FR).  
DORNSTETTER, Jean-Louis [FR/FR]; 25, place Suzanne  
Lenglen, F-78370 Plaisir (FR).(74) Mandataire: RENAUD-GOUD, Thierry; Renaud-Goud  
Conseil, Le Tertre I, 5, rue Charles Duchesne, F-13851  
Aix-en-Provence Cedex 3 (FR).(81) Etats désignés: BR, CA, CN, US, brevet européen (AT, BE,  
CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,  
NL, PT, SE).

## Publiée

Avec rapport de recherche internationale.  
Avant l'expiration du délai prévu pour la modification des  
revendications, sera republiée si des modifications sont  
reçues.

(54) Title: SPACE-WEIGHTED COMMUNICATION PATH ESTIMATION

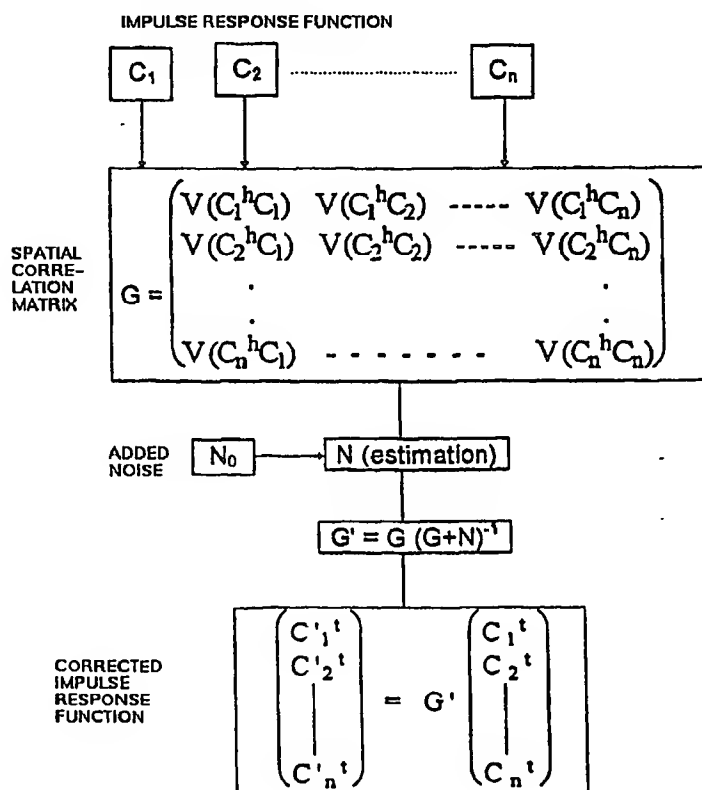
(54) Titre: SONDAGE A PONDERATION SPATIALE D'UNE VOIE DE TRANSMISSION

## (57) Abstract

The invention concerns a method for estimating a communication path formed by several channels. Said method requiring an estimation of the impulse response function ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) of said channels comprises the following steps: acquiring a spatial statistic of said communication path; establishing a corrected impulse response function ( $C'_1, C'_2, \dots, C'_n$ ) at least by weighting the pulse response functions ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) using the spatial statistic and an additive noise estimation ( $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$ ) of these channels.

## (57) Abrégé

L'invention concerne un procédé de sondage d'une voie de transmission formée de plusieurs canaux. Ce procédé qui nécessite une estimation de la réponse impulsionnelle ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) de ces canaux comprend les étapes suivantes: acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de transmission, établissement d'une réponse impulsionnelle corrigée ( $C'_1, C'_2, \dots, C'_n$ ) au moins par pondération des estimations de réponses impulsionnelles ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) au moyen de la statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif ( $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$ ) de ces canaux.



Sondage à pondération spatiale d'une voie de transmission

La présente invention concerne un procédé de sondage d'une voie de transmission formée de plusieurs canaux. Il s'agit donc d'une technique connue sous le nom de diversité de réception, technique selon laquelle un récepteur comporte plusieurs antennes chacune associée à un canal de transmission distinct. En d'autres termes, l'invention propose une méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle de ces canaux de transmission.

10 En effet, dans un système de transmission, notamment par ondes radio, le récepteur reçoit pour chaque canal de transmission un signal émis par un émetteur. Le signal émis subit des fluctuations d'amplitude et de phase dans le canal de transmission, si bien que le signal reçu par le récepteur  
15 ne lui est pas identique. Les fluctuations du signal sont essentiellement dues à ce que l'homme de métier appelle l'interférence intersymbole. Cette interférence peut provenir de la loi de modulation employée pour la transmission et elle est également due à la propagation  
20 multi-trajets dans le canal.

Il se trouve que le signal reçu est généralement issu d'un grand nombre de réflexions dans le canal, les différents trajets empruntés par le signal émis conduisant ainsi à des retards variés au niveau du récepteur. La  
25 réponse impulsionnelle du canal représente l'ensemble de ces fluctuations, auxquelles est soumis le signal émis. Il s'agit donc là de la caractéristique fondamentale représentant les transmissions entre l'émetteur et le récepteur.

30 La réponse impulsionnelle du canal est utilisée notamment par un égaliseur qui a précisément pour fonction de corriger l'interférence intersymbole dans le récepteur. Une méthode classique pour réaliser une estimation de cette réponse impulsionnelle consiste à disposer dans le signal  
35 émis une séquence d'apprentissage formée de symboles connus.

Cette séquence est choisie en fonction de la loi de modulation et de la dispersion du canal, dispersion devant s'entendre ici comme le retard d'un symbole émis empruntant le trajet le plus long du canal par rapport à ce même  
 5 symbole empruntant le trajet le plus court. La dispersion est couramment exprimée comme un multiple de la durée qui sépare deux symboles émis successifs, soit un nombre de "durée symbole".

A titre d'exemple, on citera deux techniques connues  
 10 d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal de transmission.

La première technique fait appel à des séquences d'apprentissage particulières dites séquences CAZAC, pour l'expression anglo-saxonne "Constant Amplitude Zero  
 15 Autocorrelation". De telles séquences sont décrites dans l'article de A. MILEWSKI : "Periodic sequences with optimal properties for channel estimation and fast start-up equalization", IBM Journal of Research and Development, vol.27, N°5, Sept.83, pages 426-431.

20 Le système de radiocommunication cellulaire numérique GSM fait appel à des séquences d'apprentissage TS formées de 26 symboles notés  $a_0$  à  $a_{25}$  prenant la valeur +1 ou -1. Ces séquences possèdent les propriétés suivantes :

$$25 \quad \sum_{i=5}^{20} a_i^2 = 16$$

$$\sum_{i=5}^{20} a_i a_{i+k} = 0 \quad \text{si } 0 < |k| \leq 5$$

En notant  $d$  la dispersion du canal qui vaut 4 dans le cas du GSM, l'estimation de la réponse impulsionnelle prend  
 30 la forme d'un vecteur  $X$  à 5 composants notés  $x_0$  à  $x_4$ .

La séquence de symboles reçus  $S$  correspondant à la séquence d'apprentissage TS est formée elle aussi de 26 symboles notés  $s_0$  à  $s_{25}$ . On suppose naturellement ici que

l'émetteur et le récepteur sont parfaitement synchronisés et dans ce cas l'estimation de la réponse impulsionnelle  $X$  est donnée par l'expression suivante :

$$x_k = \frac{1}{16} \sum_{i=5}^{20} a_i s_{i+k} \quad \text{pour } 0 \leq k \leq 4$$

5 La technique CAZAC présente l'avantage d'une grande simplicité de mise en oeuvre. Cependant, on remarque que chaque composante de la réponse impulsionnelle est établie à partir de seulement 16 symboles reçus. Etant donné que la séquence d'apprentissage comprend 26 symboles et que la  
10 dispersion du canal vaut 4, il y a de l'information dans le signal reçu qui n'est pas prise en compte et cela conduit à une réduction des performances par rapport à l'idéal théorique.

La deuxième technique connue fait appel au critère des  
15 moindres carrés. Elle est décrite notamment dans les demandes de brevet FR 2 696 604 et EP 0 564 849. En matière de rappel, cette technique fait appel à une matrice de mesure  $A$  construite à partir de la séquence d'apprentissage  $TS$  de longueur  $n$ . Cette matrice comprend  $(n-d)$  lignes et  
20  $(d+1)$  colonnes,  $d$  représentant toujours la dispersion du canal. L'élément figurant à la  $i$ ème ligne et à la  $j$ ème colonne est le  $(d+i-j)$ ème symbole de la séquence d'apprentissage :

25

$$A = \begin{pmatrix} a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{25} & \dots & \dots & \dots & a_{21} \end{pmatrix}$$

La séquence d'apprentissage est choisie telle que la matrice  $A^t A$  soit inversible où l'opérateur  $.^t$  représente la transposition. C'est naturellement le cas pour les séquences CAZAC mais c'est également le cas pour d'autres séquences.

5 Dans la séquence de symboles reçus, on ne prend pas en compte les quatre premiers  $s_0$  à  $s_3$  car ceux-ci dépendent également de symbole inconnus émis avant la séquence d'apprentissage, étant donné que la dispersion du canal vaut 4. Par un abus de langage on définira donc dorénavant le  
10 signal reçu comme un vecteur  $S$  ayant pour composantes les symboles reçus,  $s_4, s_5, s_6, \dots, s_{25}$ .

Dès lors, l'estimation de la réponse impulsionnelle prend la forme suivante :

$$X = (A^t A)^{-1} A^t . S$$

15 Cette technique des moindres carrés est un peu plus complexe que la précédente mais il faut noter que la matrice  $(A^t A)^{-1} A^t$  est calculée une seule fois. On remarque ici que chacune des composantes de l'estimation de la réponse impulsionnelle  $X$  est établie à partir de 22 symboles reçus  
20 et non pas de 16 comme dans le cas de la technique CAZAC. On doit donc s'attendre à une amélioration des performances.

Cependant, quelle que soit la technique utilisée, les réponses impulsionnelles de chacun des canaux de la voie de transmission sont considérées comme indépendantes.

25 La présente invention a ainsi pour premier objet un procédé de sondage d'une voie de transmission qui prend en compte le fait que les différentes antennes sont spatialement liées.

Selon l'invention, le procédé de sondage d'une voie de  
30 transmission s'applique lorsque cette voie est formée de plusieurs canaux et il nécessite une estimation de la réponse impulsionnelle  $C_1, C_2, \dots, C_n$  de ces canaux. Le procédé comprend les étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de  
35 transmission,

- établissement d'une réponse impulsionnelle corrigée au moins par pondération de ces estimations de réponses impulsionnelles au moyen de cette statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif de ces canaux.

5       Avantageusement, cette statistique spatiale correspond à une estimation de la corrélation des canaux de transmission pris deux à deux.

      Suivant un mode de réalisation préférentiel, cette estimation de la corrélation des canaux de transmission  
10 prend la forme d'une matrice de corrélation spatiale ainsi définie que l'élément figurant à la ième ligne et à la jème colonne soit obtenu par lissage du produit de la transposée hermitienne de la réponse impulsionnelle estimée du ième canal et de la réponse impulsionnelle estimée du jème  
15 canal.

      Selon une caractéristique additionnelle, un signal reçu S par un premier canal correspondant à une séquence d'apprentissage émise, en notant A la matrice de mesure associée à cette séquence d'apprentissage, l'estimation du  
20 bruit additif  $N_{01}$  de ce canal est obtenue par normalisation de l'énergie du vecteur  $(S - AC_1)$ .

      On peut prévoir que cette normalisation soit suivie d'une étape de moyennage.

      De plus, une matrice de bruit N étant formée à partir  
25 de l'estimation du bruit additif  $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$  des canaux, une matrice de pondération spatiale G' étant ainsi définie à partir de la matrice de corrélation spatiale G et de la matrice de bruit :

$$G' = G (G + N)^{-1},$$

30 les réponses impulsionnelles corrigées  $C'_1, C'_2, \dots, C'_n$  sont obtenues par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} c_1'^t \\ c_2'^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ c_n'^t \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} c_1^t \\ c_2^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ c_n^t \end{pmatrix}$$

Le procédé de sondage d'une voie de transmission est donc mis en oeuvre à partir de l'estimation de la réponse impulsionnelle des différents canaux considérés comme autant  
 5 de canaux indépendants. Or les erreurs d'estimation sont inévitables. De manière générale, la détermination de la réponse impulsionnelle d'un canal de transmission unique est un problème qui ne peut être résolu de façon exacte en présence de bruit additif. De plus les techniques  
 10 antérieures font l'hypothèse implicite que cette réponse impulsionnelle peut prendre une forme quelconque.

La présente invention a ainsi pour deuxième objet une méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal de transmission qui présente une meilleure résistance au  
 15 bruit additif ou, autrement dit, qui mène à une erreur réduite comparée à l'erreur d'estimation des techniques connues. Cette méthode sera avantageusement appliquée pour l'un au moins des canaux formant la voie de transmission avant l'établissement des réponses impulsionnelles corrigées  
 20 par pondération au moyen de la statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif de ces canaux.

Selon l'invention, cette méthode nécessite un signal reçu par un canal, ce signal reçu correspondant à une séquence d'apprentissage émise. La méthode comprend les  
 25 étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique temporelle de ce canal de transmission,
- établissement de l'estimation de la réponse impulsionnelle de ce canal, cette estimation étant pondérée par la  
 30 statistique temporelle du canal au moyen du signal reçu.

La statistique temporelle du canal représente une valeur de la réponse impulsionnelle antérieure à l'acquisition du signal reçu. La susdite pondération introduit le fait que la réponse impulsionnelle afférente au signal reçu a une valeur probablement plus proche de cette valeur antérieure qu'une valeur qui en serait très éloignée. Ainsi, statistiquement, l'erreur d'estimation est diminuée.

Avantageusement, cette statistique correspond à une estimation de la covariance de cette réponse impulsionnelle.

10 Selon une première variante du procédé, celui-ci comprend les étapes suivantes :

- lissage de la réponse impulsionnelle et orthonormalisation au moyen d'une matrice de transformation W pour obtenir l'estimation de la covariance qui prend alors la forme d'une

15 matrice L',

- recherche des vecteurs propres  $v_i'$  et valeurs propres  $\lambda_i'$  associées de cette matrice L',

- estimation de la réponse impulsionnelle instantanée du canal à partir du signal reçu et application de cette

20 matrice de transformation W pour former un vecteur X',

l'établissement de l'estimation pondérée  $x_p$  étant ainsi réalisée :

$$x_p = \sum \left( \frac{\lambda_i' - N_0}{\lambda_i'} (v_i'^h \cdot x') \right) W v_i'^h$$

où  $N_0$  est un nombre réel strictement positif représentant le  
25 bruit additif du canal.

On peut ici prévoir que le bruit additif soit choisi égal à la plus petite des valeurs propres  $\lambda_i'$ .

Lorsqu'un sous-ensemble de ces valeurs propres  $\lambda_i'$  présente une contribution inférieure à un seuil  
30 prédéterminé, on peut également prévoir que chacune de ces valeurs propres soit forcée à la valeur du bruit additif.

La complexité s'en trouve réduite d'autant.

Selon une seconde variante du procédé, l'estimation de la covariance prenant la forme d'une matrice R, en notant A



la matrice de mesure associée à la séquence d'apprentissage, l'établissement de l'estimation pondérée est ainsi réalisé :

$$X_p = (A^t A + N_0 R^{-1})^{-1} A^t . S$$

où  $N_0$  est un réel strictement positif représentant le bruit additif du canal.

Par ailleurs, il est possible d'effectuer une étape d'orthonormalisation de la matrice  $R$  au moyen d'une matrice de transformation  $W$  pour obtenir une nouvelle matrice  $R'$ , l'estimation pondérée prenant alors la nouvelle forme suivante :

$$X_p = W^t (I + N_0 R'^{-1})^{-1} W^t A^t . S$$

où la matrice  $A'$  est égale au produit de la matrice de transformation  $W$  et de la matrice de mesure  $A$ .

Avantageusement, l'expression  $(I + N_0 R'^{-1})^{-1}$  est calculée au moyen du lemme d'inversion matricielle.

La présente invention apparaîtra maintenant de manière plus détaillée dans le cadre de la description qui suit où sont proposés des exemples de mise en oeuvre à titre illustratif, ceci en référence aux figures annexées qui représentent :

- la figure 1, un diagramme identifiant les principales étapes d'un mode de mise en oeuvre du procédé de sondage d'une voie de transmission selon l'invention,
- la figure 2, une première variante d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal selon l'invention,
- la figure 3, une deuxième variante d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal selon l'invention.

L'invention sera présentée dans son application au GSM car ce système a le mérite d'être bien connu de l'homme du métier. Il s'agit donc là d'une présentation adoptée dans un souci de clarté mais il ne faut y voir en aucun cas une limitation de l'invention à ce seul système.

En référence à la figure 1, le procédé de sondage d'une voie de transmission s'applique lorsque cette voie comporte au moins deux canaux de transmission,  $n$  canaux dans le cas général. Les canaux correspondent chacun à une

antenne distincte. On considère donc que chaque canal a fait l'objet d'une estimation de sa réponse impulsionnelle respective  $C_1, C_2, \dots, C_n$  selon l'une quelconque des techniques disponibles.

- 5 En premier lieu le procédé prévoit l'acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de transmission. Par statistique spatiale on entend un ensemble de données reflétant le comportement de cette voie sur une période prédéterminée que l'on conviendra d'appeler période de
- 10 corrélation. En effet, les différentes antennes étant fixes, les signaux reçus sur ces antennes présentent un certain degré de corrélation. L'invention entend précisément tirer parti de ce fait pour améliorer la qualité d'estimation de la réponse impulsionnelle de l'un des canaux au moins. A
- 15 titre d'exemple, une telle statistique peut être obtenue au moyen d'une matrice de corrélation spatiale  $G$  :

$$G = \begin{pmatrix} v(c_1^h c_1) & v(c_1^h c_2) & \dots & v(c_1^h c_n) \\ v(c_2^h c_1) & v(c_2^h c_2) & \dots & v(c_2^h c_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v(c_n^h c_1) & v(c_n^h c_2) & \dots & v(c_n^h c_n) \end{pmatrix}$$

où l'opérateur  $.^h$  représente la transposition hermitienne.

- 20 Cette matrice  $G$  carrée de dimension  $(n,n)$  peut ainsi être représentée de manière générique par l'élément  $g_{ij}$  figurant à la  $i$ ème ligne et à la  $j$ ème colonne :

$$g_{ij} = v(c_i^h c_j)$$

- Cet élément  $g_{ij}$  est obtenu par lissage du produit  $c_i^h c_j$
- 25 au moyen des réponses impulsionnelles estimées  $C_i, C_j$  des  $i$ ème et  $j$ ème canaux obtenues durant la période de corrélation. Ce lissage est une estimation de la corrélation de ces deux canaux.

On entend ici lissage dans un sens très général, c'est-à-dire toute opération permettant de lisser ou de moyenner le produit  $C_i^h C_j$  sur la période de corrélation.

Un premier exemple de lissage consiste à faire la  
5 moyenne de ce produit sur cette période supposée comprendre  $e$  estimations successives de chacune des réponses impulsionnelles  $C_1, C_2, \dots, C_n$  :

$$v(C_i^h C_j) = \frac{1}{e} \sum_{1}^e C_i^h C_j$$

10 Un deuxième exemple de lissage consiste à actualiser, à la  $p$  ième estimation reçue pour chacun des  $i$ ème et  $j$ ème canaux, l'expression de lissage  $v_{p-1}(C_i^h C_j)$  obtenue à la  $(p-1)$  ième estimation au moyen d'un coefficient multiplicatif  $\alpha$ , ce coefficient compris entre 0 et 1 étant  
15 souvent connu sous le nom de facteur d'oubli de lissage :

$$v_p(C_i^h C_j) = \alpha C_i^h C_j + (1-\alpha) v_{p-1}(C_i^h C_j)$$

L'initialisation peut se faire par tous moyens, notamment au moyen de la première estimation obtenue ou bien par une moyenne obtenue comme dans le premier exemple pour  
20 les premières estimations reçues.

Le procédé de sondage propose ensuite de réaliser une estimation du bruit additif  $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$  présent dans chacun des canaux au moyen des estimations des réponses impulsionnelles respectives  $C_1, C_2, \dots, C_n$  de ces canaux.

25 Il sera proposé différentes solutions pour mener à bien cette estimation du bruit et on traitera le cas d'un seul canal, le premier par exemple, étant donné que les mêmes solutions s'appliquent à chacun des canaux.

Une solution simple consiste à affecter  $N_{01}$  d'une  
30 valeur prédéterminée qui reflète un seuil en dessous duquel il est peu probable que le bruit additif puisse descendre. Cette valeur pourrait être déterminée par une mesure de

rapport signal à bruit, ou par les performances du récepteur, ceci à titre d'exemple.

Par ailleurs, l'estimation du bruit  $N_{01}$  peut être obtenue au moyen de l'estimation de la réponse  
5 impulsionnelle  $C_1$  du premier canal et du signal reçu correspondant  $S$ . Cette estimation du bruit a donc pu être réalisée avant la mise en oeuvre du procédé de sondage à pondération spatiale selon quelque technique que ce soit. Toutefois, si ce n'était pas le cas, on propose ici une  
10 méthode appropriée lorsque l'estimation de la réponse impulsionnelle  $C_1$  est acquise selon la technique des moindres carrés.

Il s'agit donc d'estimer directement le bruit additif à partir du signal reçu  $S$  et de la matrice de mesure  $A$ . En  
15 effet, en notant  $N_1$  le vecteur bruit affectant le signal reçu, il vient que :

$$S = AC_1 + N_1$$

Compte tenu du fait que les vecteurs  $S$  et  $N_1$  ont 22 composantes, l'estimation du bruit  $N_{01}$  prend la forme  
20 suivante :

$$N_{01} = \left(\frac{1}{22}\right) (S - AC_1)^h (S - AC_1)$$

Naturellement cette estimation du bruit additif  $N_{01}$  peut être moyennée ou lissée.

A partir des estimations du bruit additif des  
25 différents canaux  $N_{01}$ ,  $N_{02}$ , ...,  $N_{0n}$ , on construit une matrice de bruit  $N$  dont l'élément figurant à la  $i$ ème ligne et à la  $j$ ème colonne est noté  $n_{ij}$ .

Lorsque  $i$  est égal à  $j$ , cet élément  $n_{ij}$  prend la valeur du bruit estimé  $N_{0i}$ .

30 Lorsque  $i$  et  $j$  sont différents, l'élément  $n_{ij}$  est nul.

Par ailleurs, toujours dans un souci de simplification, il est possible de calculer la valeur moyenne  $N_0$  des bruits estimés  $N_{01}$ ,  $N_{02}$ , ...,  $N_{0n}$  et de forcer chacun des éléments  $n_{ij}$  de la diagonale de cette  
35 matrice  $N$  à cette valeur moyenne  $N_0$ . En notant  $I$  la matrice

identité, il s'ensuit que la matrice de bruit  $N$  prend la forme suivante :

$$N = N_0 I$$

La matrice de corrélation  $G$  et la matrice de bruit  $N$  permettent de définir une nouvelle matrice, la matrice de pondération spatiale  $G'$  :

$$G' = G(G + N)^{-1}$$

Les réponses impulsionnelles corrigées  $C'_1, C'_2, \dots, C'_n$  au moyen de cette matrice de pondération spatiale  $G'$  sont ainsi définies :

$$\begin{pmatrix} C'_1{}^t \\ C'_2{}^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C'_n{}^t \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} C_1{}^t \\ C_2{}^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_n{}^t \end{pmatrix}$$

où l'opérateur  ${}^t$  représente toujours la transposition.

L'une au moins des réponses impulsionnelles corrigées  $C'_1$  est utilisée à la place de l'estimation de la réponse impulsionnelle  $C_1$  dans le récepteur.

A titre optionnel, l'invention permet également d'améliorer l'estimation de la réponse impulsionnelle  $C_1, C_2, \dots, C_n$  de chacun des canaux, ceci avant la mise en oeuvre du procédé de sondage à pondération spatiale d'une voie de transmission, c'est-à-dire avant l'établissement de la ou des réponses impulsionnelles corrigées  $C'_1, C'_2, \dots, C'_n$ .

On prévoit ainsi l'acquisition d'une statistique temporelle pour l'un au moins de ces canaux, le premier par exemple. Par statistique temporelle, on entend un ensemble de données reflétant le comportement de ce canal considéré indépendamment des autres canaux sur une période prédéterminée que l'on conviendra d'appeler période d'analyse. Il s'agit donc d'une représentation du comportement moyen du canal pendant la période d'analyse.

Cette statistique peut être établie par quelque moyen que ce soit et en quelque lieu que ce soit. En effet, l'établissement de la statistique peut prendre place dans un équipement quelconque du réseau de radiocommunication. Ce  
 5 qui importe c'est que le récepteur puisse acquérir cette statistique.

A titre d'exemple, une telle statistique temporelle peut être obtenue de la manière suivante.

Au moyen du signal reçu  $S$  pendant la période  
 10 d'analyse, on calcule une estimation  $X$  de la réponse impulsionnelle selon une méthode connue.

Si l'on retient la technique des moindres carrés cette estimation  $X$  vaut :

$$X = (A^t A)^{-1} A^t \cdot S \quad (1)$$

15 On rappelle ici que l'émetteur et le récepteur sont supposés synchronisés à mieux que un demi-symbole près, auquel cas le signal de réception est formé par le vecteur  $S$  dont les composantes sont les symboles reçus  $s_4$  à  $s_{25}$  synchrones des symboles  $a_4$  à  $a_{25}$  de la séquence  
 20 d'apprentissage  $TS$ . Si une telle synchronisation n'était pas acquise, plusieurs solutions sont disponibles pour l'acquérir et on en citera deux à titre d'exemple.

La première solution consiste à décaler le signal reçu en avance ou en retard de  $j$  périodes symboles de sorte que  
 25  $S_j^t = (s_{4-j}, s_{5-j}, s_{6-j}, \dots, s_{25-j})$ .

On calcule alors l'estimation  $X_j$  pour chacun des vecteurs  $S_j$  et on retient la valeur  $j_M$  pour laquelle  $X_j^h \cdot X_j$  est maximal. Cette valeur  $j_M$  donne la synchronisation escomptée et il suffit de remplacer le vecteur  $S$  dans  
 30 l'équation (1) par le vecteur  $S_{j_M}$ .

La deuxième solution consiste à augmenter artificiellement la dispersion  $d$  du canal d'une quantité  $2q$  prédéterminée. On peut alors définir une matrice de mesure modifiée  $A_m$  comprenant  $(n-d-2q)$  lignes et  $(d+2q+1)$  colonnes.  
 35 En reprenant les valeurs 26 et 4 respectivement pour  $n$  et  $d$  :

$$A_m = \begin{pmatrix} a_4 + 2q \dots a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 + 2q \dots a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_6 + 2q \dots a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 + 2q \dots & & & & \\ \dots & & & & \\ \dots & & & & \\ a_{25} \dots & & & a_{21} - 2q \end{pmatrix}$$

Il faut alors réduire le nombre de composantes du signal reçu  $S$  de cette même quantité  $2q$  et on peut convenir de retenir le vecteur  $S_m$  modifié :

$$S_m^t = (s'_{4+q}, s'_{5+q}, \dots, s'_{25-q})$$

On obtient ainsi une estimation modifiée  $X_m$  :

$$X_m = (A_m^t A_m) A_m^t \cdot S_m$$

Cette estimation modifiée  $X_m$  comporte  $d+2q+1$  composantes :

$$X_m^t = (x_{-q}, \dots, x_0, x_1, \dots, x_4, \dots, x_{4+q})$$

On recherche alors la valeur  $j_M$  de  $j$  comprise entre  $-q$  et  $+q$  qui maximise l'expression suivante :

$$\sum_{k=0}^4 x_j^* + k x_j + k$$

où l'opérateur  $.*$  représente la conjugaison complexe.

Cette valeur  $j_M$  détermine l'estimation  $X$  de la réponse impulsionnelle pour une dispersion  $d=4$  :

$$X^t = (x_{j_M}, x_{j_M+1}, \dots, x_{j_M+4})$$

La synchronisation s'en déduit immédiatement en appliquant le décalage  $j_M$  au signal reçu  $S$ .

On peut dès lors appliquer à nouveau l'équation (1).

On construit maintenant une matrice de lissage  $L$  par lissage des différentes estimations  $X$  obtenues pendant la période d'analyse pour obtenir une estimation de la

covariance associée à cette réponse impulsionnelle. On entend ici lissage dans un sens très général, c'est-à-dire toute opération permettant de lisser ou de moyenner la réponse impulsionnelle sur la période d'analyse. On obtient  
 5 ainsi une représentation statistique du comportement du canal de transmission. Ce lissage peut être obtenu notamment par l'une des deux méthodes proposées ci-dessus, l'expression la plus simple de cette matrice de lissage  $L$  étant la suivante :

$$10 \quad L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x x^h$$

où  $m$  correspond au nombre de séquences d'apprentissage sur lequel est calculé le lissage.

On admet ici que cette matrice de lissage peut être approchée par l'équation suivante :

$$15 \quad L \simeq (A^t A)^{-1} N_0 + R \quad (2)$$

où  $N_0$  représente toujours le bruit présent dans le canal de transmission ou bruit additif et où  $R$  est une matrice que l'on a coutume d'appeler statistique à priori du canal car elle représente le comportement du canal  
 20 abstraction faite du bruit.

On admet également que la matrice de mesure  $A$  est bien conditionnée, c'est-à-dire que les valeurs propres de la matrice  $A^t A$  sont très proches les unes des autres. Dans ce cas, il est intéressant de procéder à l'orthonormalisation  
 25 des vecteurs constitués par les lignes de la matrice de mesure  $A$ , mais il ne faut pas voir là une limitation de l'invention.

Pour ce faire, on emploie une matrice de transformation  $W$  telle que :

$$30 \quad A' = AW \text{ et } A'^t A' = I$$

où  $I$  représente la matrice identité.

En notant  $L'$  la matrice ainsi définie :

$$L = W L' W^t,$$

il vient que l'équation (2) peut maintenant s'écrire :

$$35 \quad L' \simeq N_0 I + R' \quad (3)$$



Selon une première variante représentée à la figure 2, on remarque que les vecteurs propres  $v_i'$  de  $L'$  et  $v_i$  de  $R'$  sont identiques tandis que les valeurs propres  $\lambda_i'$  de  $L'$  et  $\lambda_i$  de  $R'$  sont décalées de  $N_0$ . Soit en prenant toujours la même valeur de 4 pour la dispersion du canal, pour tout  $i$  compris entre 0 et 4 :

$$\begin{aligned} v_i' &= v_i \\ \lambda_i' &= \lambda_i + N_0 \end{aligned}$$

Il apparaît ainsi que la détermination des vecteurs propres et valeurs propres de  $R'$  et celle de  $L'$  sont identiques sous réserve que  $N_0$  soit connu.

L'étape d'estimation du bruit sera décrite plus loin pour rendre l'exposé plus clair, bien que cette étape précède celle qui va maintenant être explicitée.

Il convient donc maintenant de rechercher les couples valeur-propre/vecteur-propre pour l'une ou l'autre des matrices  $L'$  ou  $R'$ . Cette étape ne sera pas plus détaillée car bien connue de l'homme du métier. Par ailleurs, il va sans dire que l'on peut annuler les valeurs propres dont la contribution est jugée non significative. Par exemple, si ces valeurs propres sont classées par ordre décroissant, on supprime les dernières qui sont telles que leur somme soit inférieure à un seuil prédéterminé.

L'étape suivante consiste à estimer la réponse impulsionnelle instantanée  $X$  établie selon l'une quelconque des techniques connues à partir du signal reçu correspondant à la dernière séquence d'apprentissage reçue. En notant  $X = WX'$ , cette dernière estimation est pondérée par la méthode suivante pour obtenir une pondération temporelle  $X_p$  de la réponse impulsionnelle instantanée :

$$\begin{aligned} X_p &= \sum_{i=0}^4 \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_i + N_0} (v_i^h X') \right) W v_i \\ X_p &= \sum_{i=0}^4 \left( \frac{\lambda_i' - N_0}{\lambda_i'} (v_i^h X') \right) W v_i \end{aligned}$$

Pour obtenir la pondération  $X_p$  il faut donc estimer le bruit additif  $N_0$ .

Cette estimation du bruit peut être effectuée notamment selon l'une des méthodes exposées plus haut.

- 5 Une autre possibilité consiste à considérer que la dernière valeur propre, (la plus faible) de la matrice de lissage  $L$  est égale à  $N_0$  :

$$\lambda_4' = N_0 \text{ ou } \lambda_4 = 0.$$

- 10 Quelle que soit la méthode retenue, la pondération temporelle  $X_p$  de l'estimation de la réponse impulsionnelle instantanée peut alors être réalisée comme mentionné ci-dessus.

Selon une seconde variante représentée à la figure 3, on établit l'estimation pondérée  $X_p$  directement comme suit :

15 
$$X_p = (A^t A + N_0 R^{-1})^{-1} A^t . s$$

ou bien en reprenant la matrice de transformation  $W$  définie ci-dessus :

$$X_p = W (I + N_0 R'^{-1})^{-1} W^t A^t . s \quad (4)$$

Conformément à l'équation (3) :

20 
$$R' = L' - N_0 I$$

Il convient là aussi d'estimer le bruit additif  $N_0$ .

Une solution avantageuse pour obtenir la pondération temporelle  $X_p$  consiste à adopter la méthode suivante.

On divise la matrice  $R'$  par  $N_0$  :

25 
$$B = \frac{R'}{N_0}$$

Il s'ensuit que :

$$I + N_0 R'^{-1} = I + B^{-1}$$

On utilise le lemme d'inversion matricielle pour calculer la matrice de pondération  $P = (I + B^{-1})^{-1}$ .

- 30 Ainsi, en notant  $e_i$  les vecteurs canoniques, on procède à l'itération suivante :

- initialisation :

$$P = B$$

- pour  $i$  variant de 0 à  $d$  (4 dans le cas présent) :

$$P = P - \frac{Pe_i (Pe_i)^h}{1 + e_i^h Pe_i}$$

P étant connu, il reste à établir la pondération  $X_p$  selon l'équation (4).

On remarquera que la matrice de pondération  $P$  n'est pas nécessairement calculée à l'occasion de chaque nouvelle séquence d'apprentissage émise. Elle peut être calculée à un rythme plus lent car elle varie sensiblement au même rythme que  $R'$  et donc plus lentement que le signal reçu  $S$ .

On remarquera également que l'estimation pondérée est réalisée sans avoir recours à la réponse impulsionnelle instantanée. Elle est produite directement à partir du signal reçu  $S$ .

Quelle que soit la variante retenue, c'est donc l'estimation pondérée  $X_p$  qui sera avantageusement utilisée comme estimation de la réponse impulsionnelle  $C_1$  pour la mise en oeuvre du procédé de sondage à pondération spatiale d'une voie de transmission, c'est-à-dire pour produire une ou plusieurs réponses impulsionnelles corrigées.

REVENDICATIONS

1) Procédé de sondage d'une voie de transmission formée de plusieurs canaux, ce procédé nécessitant une estimation de la réponse impulsionnelle ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) de ces canaux, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de transmission,
- établissement d'une réponse impulsionnelle corrigée ( $C'_1, C'_2, \dots, C'_n$ ) au moins par pondération desdites estimations de réponses impulsionnelles ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) au moyen de ladite statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif ( $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$ ) desdits canaux.

2) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite statistique spatiale correspond à une estimation de la corrélation desdits canaux de transmission pris deux à deux.

3) Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que cette estimation de la corrélation des canaux de transmission prend la forme d'une matrice de corrélation spatiale ( $G$ ) ainsi définie que l'élément ( $g_{ij}$ ) figurant à la  $i$ ème ligne et à la  $j$ ème colonne soit obtenu par lissage du produit ( $C_i^H C_j$ ) de la transposée hermitienne de la réponse impulsionnelle estimée ( $C_i$ ) du  $i$ ème canal et de la réponse impulsionnelle estimée ( $C_j$ ) du  $j$ ème canal.

4) Procédé selon la revendication 3 caractérisé en ce que, un signal reçu  $S$  par un canal correspondant à une séquence d'apprentissage émise, en notant  $A$  la matrice de mesure associée à ladite séquence d'apprentissage, l'estimation du bruit additif ( $N_{01}$ ) de ce canal est obtenue par normalisation de l'énergie du vecteur ( $S - AC_1$ ).

5) Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite normalisation est suivie d'une étape de moyennage.

6) Procédé selon l'une quelconque des revendications 3 à 5 caractérisé en ce que, une matrice de

bruit (N) étant formée à partir de l'estimation du bruit additif ( $N_{01}$ ,  $N_{02}$ , ...,  $N_{0n}$ ) des canaux, une matrice de pondération spatiale ( $G'$ ) étant ainsi définie à partir de ladite matrice de corrélation spatiale ( $G$ ) et de ladite

5 matrice de bruit :

$$G' = G (G + N)^{-1},$$

lesdites réponses impulsionnelles corrigées ( $C'_1$ ,  $C'_2$ , ...,  $C'_n$ ) sont obtenues par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} C'_1{}^t \\ C'_2{}^t \\ \vdots \\ C'_n{}^t \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} C_1{}^t \\ C_2{}^t \\ \vdots \\ C_n{}^t \end{pmatrix}$$

10 7) Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 caractérisé en ce que, avant l'établissement de ladite réponse impulsionnelle corrigée ( $C'_1$ ) d'un canal, le signal reçu (S) par ce canal correspondant à une séquence d'apprentissage émise, il

15 comprend les étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique temporelle de ce canal de transmission,
- établissement de l'estimation de la réponse impulsionnelle ( $C_1$ ) dudit canal, cette estimation ( $X_p$ ) étant pondérée par

20 la dite statistique temporelle du canal au moyen dudit signal reçu (S).

8) Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite statistique temporelle correspond à une estimation de la covariance de ladite réponse

25 impulsionnelle.

9) Procédé selon la revendication 8 caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- lissage de ladite réponse impulsionnelle et orthonormalisation au moyen d'une matrice de transformation

30 W pour obtenir ladite estimation de la covariance qui prend alors la forme d'une matrice  $L'$ ,

- recherche des vecteurs propres ( $v_i'$ ) et valeurs propres ( $\lambda_i'$ ) associées de cette matrice  $L'$ ,
- estimation de la réponse impulsionnelle instantanée du canal à partir dudit signal reçu ( $S$ ) et application de cette
- 5 matrice de transformation  $W$  pour former un vecteur  $X'$ ,
- l'établissement de ladite estimation pondérée ( $X_p$ ) étant ainsi réalisée :

$$X_p = \sum \left( \frac{\lambda_i' - N_0}{\lambda_i'} (v_i'^h \cdot X') \right) W v_i'^h$$

où  $N_0$  est un nombre réel strictement positif représentant le  
10 bruit additif dudit canal.

10) Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit bruit additif ( $N_0$ ) est choisi égal à la plus petite desdites valeurs propres ( $\lambda_i'$ ).

11) Procédé selon l'une quelconque des revendications 9  
15 ou 10, caractérisé en ce qu'un sous-ensemble desdites valeurs propres ( $\lambda_i'$ ) présentant une contribution inférieure à un seuil prédéterminé, chacune de ces valeurs propres est forcée à la valeur dudit bruit additif ( $N_0$ ).

12) Procédé selon la revendication 8 caractérisé en  
20 ce que ladite estimation de la covariance prenant la forme d'une matrice  $R$ , en notant  $A$  la matrice de mesure associée à ladite séquence d'apprentissage, l'établissement de ladite estimation pondérée ( $X_p$ ) est ainsi réalisé :

$$X_p = (A^t A + N_0 R^{-1})^{-1} A^t \cdot S$$

25 où  $N_0$  est un réel strictement positif représentant le bruit additif dudit canal.

13) Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'orthonormalisation de ladite matrice  $R$  au moyen d'une matrice de transformation  $W$   
30 pour obtenir une nouvelle matrice  $R'$ , cette estimation pondérée prenant alors la nouvelle forme suivante :

$$X_p = W^t (I + N_0 R'^{-1})^{-1} W^t A^t \cdot S$$

où la matrice  $A'$  est égale au produit de cette matrice de transformation  $W$  et de ladite matrice de mesure  $A$ .

14) Procédé selon la revendication 13, caractérisé en ce que l'expression  $(I+N_0R'^{-1})^{-1}$  est calculée au moyen du lemme d'inversion matricielle.

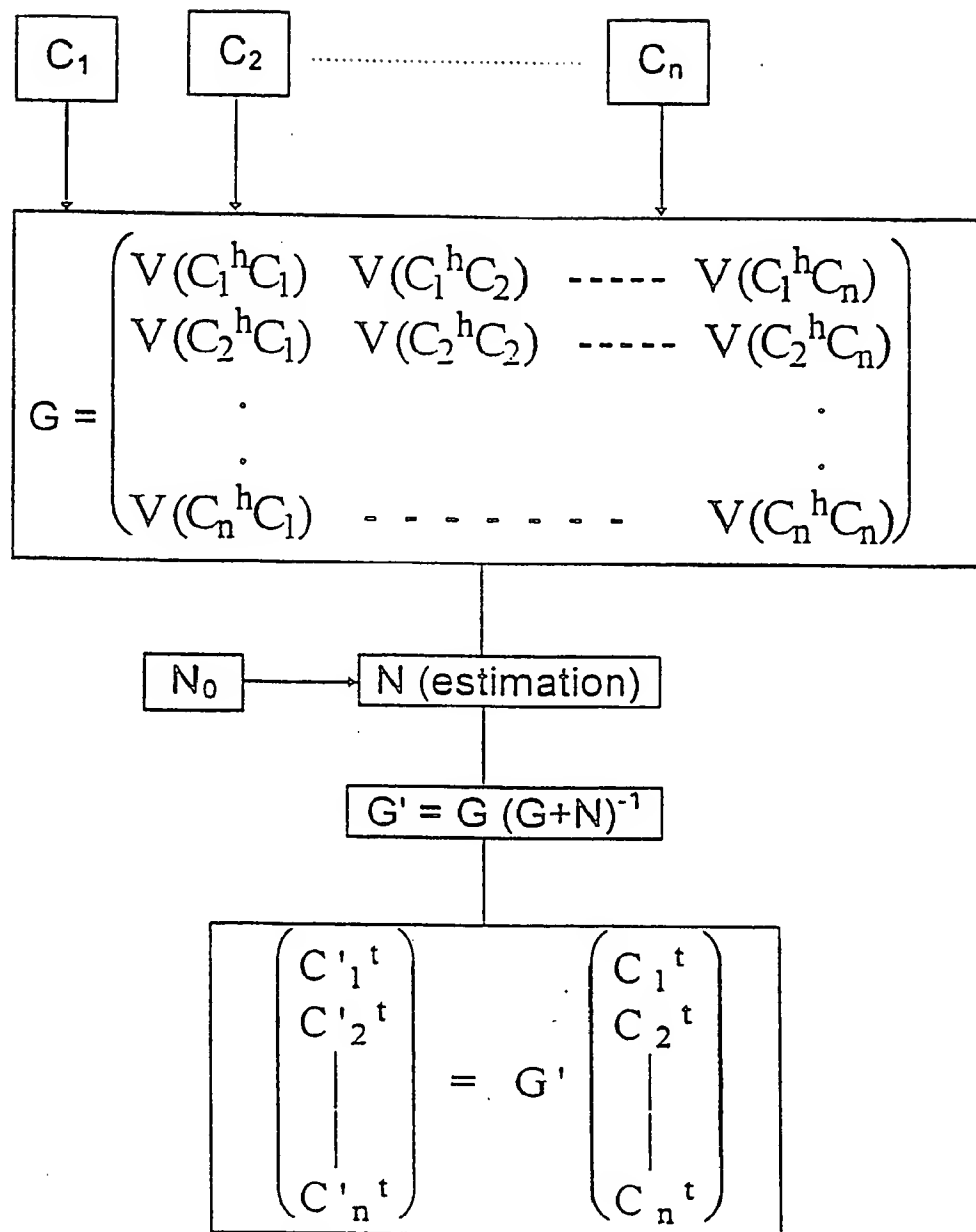


FIGURE 1



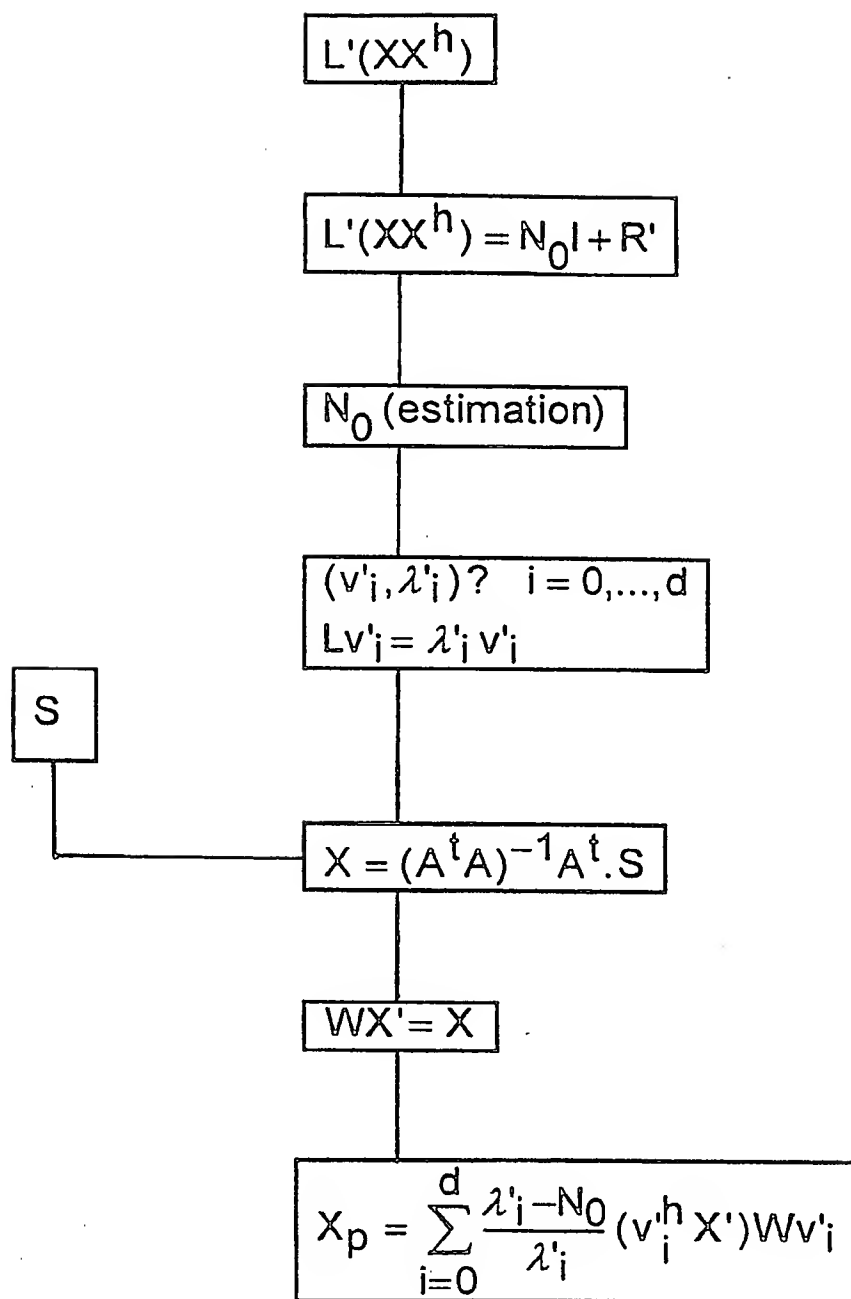


FIGURE 2

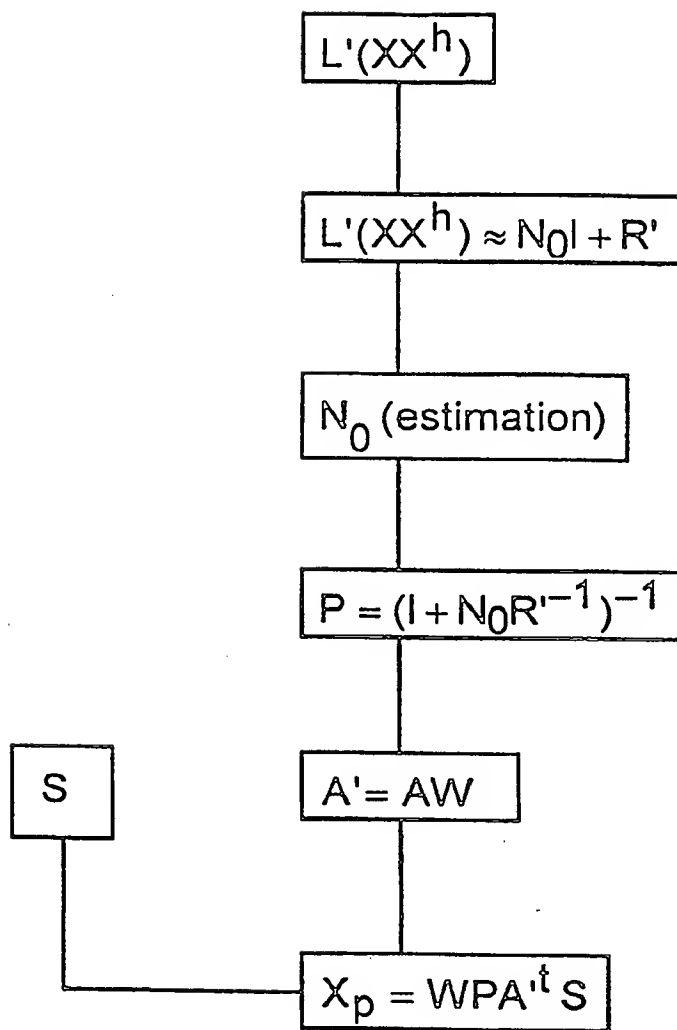


FIGURE 3